

Pengaruh Komposisi Sn dan Variasi Tekanan Kompaksi terhadap Densitas dan Kekerasan Komposit Cu-Sn untuk Aplikasi Proyektil Peluru *Frangible* dengan Metode Metalurgi Serbuk

Vicko Gestantyo Anugraha dan Widyastuti

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: wiwid@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Proyektil peluru terdiri dari tiga bagian yaitu *jacket*, *nose*, dan inti (*core*). Proyektil umumnya terbuat dari paduan timbal. Timbal mulai dikurangi penggunaannya dalam berbagai produk. Untuk mengatasi permasalahan tersebut telah dikembangkan jenis peluru yaitu peluru *frangible*. Salah satu paduan material yang dapat digunakan adalah paduan Cu-Sn. Proses pembuatan dilakukan dengan metode metalurgi serbuk dengan variasi komposisi 5, 10, dan 15 wt%Sn. Penambahan timah diharapkan dapat memberikan densitas dan kekerasan yang optimum pada komposit Cu-Sn. Sedangkan variasi tekanan kompaksi yang digunakan adalah 300, 400, dan 500 MPa. Sintering dilakukan pada temperatur 260°C selama 30 menit dengan atmosfer gas nitrogen. Berdasarkan hasil pengujian XRD, fasa yang terbentuk adalah Cu, Cu₃Sn, dan Cu₆Sn₅, densitas tertinggi pada komposisi Cu-5 wt% Sn P=500 MPa sebesar 7,446 g/cm³ dan memiliki porositas terendah sebesar 14,586%. Hasil pengujian kekerasan tertinggi pada komposisi Cu-15 wt% Sn P=500 MPa sebesar 83 HRF, nilai kekuatan tekan dan modulus elastisitas tertinggi pada Cu-15 wt% Sn P=500 MPa sebesar 275,72 MPa dan 59,43 GPa.

Kata Kunci—Cu-Sn, proyektil peluru *frangible*, komposisi dan tekanan kompaksi

I. PENDAHULUAN

Proyektil pada umumnya terbuat dari paduan timbal (Pb). Timbal merupakan salah satu bahan penyumbang polusi bagi lingkungan. Efek yang dirasakan tidak hanya bagi lingkungan tetapi juga kesehatan manusia. Peluru konvensional dapat menyebabkan cedera serius bahkan hingga kematian ketika proyektil menghantam permukaan yang keras dan menyebabkan pantulan kembali (*backsplash* dan *richocet*) berkecepatan tinggi. Saat ini dikembangkan peluru yang mampu pecah menjadi serpihan yang biasa disebut peluru *frangible*. Peluru *frangible* saat ini telah dikembangkan dengan menggunakan paduan Cu-Sn (*bronze*). Peluru *frangible* dapat digunakan pada berbagai aplikasi terutama pada kegiatan latihan menembak di ruangan tertutup maupun terbuka dengan jarak tertentu [1].

Menurut Benini [2] pemilihan material pengganti timbal (Pb) harus memiliki gaya berat yang spesifik. Proses pembuatannya dengan menggunakan metode metalurgi serbuk. Untuk membuat komposit yang menghasilkan *metal*

matrix composite (MMCs) maka dipilih logam meliputi *copper*, *iron*, *nickel*, *gold*, *silver*, *lead*, *chromium* dan paduannya dan lebih baik dengan *copper* atau paduannya. Material pengikat (*binder*) yang digunakan antara lain *tin*, *indium*, *antimony*, *lead*, *bismuth*, dan paduannya. Pemaduan antara Cu-Sn akan membentuk permukaan partikel Cu yang rapuh sehingga akan meningkatkan *frangibility*. Hal ini dikarenakan ketika Sn telah meleleh akan membasahi serbuk Cu dan membentuk lapisan yang rapuh [3].

Secara umum menurut Joys [1] densitas yang dibutuhkan untuk peluru *frangible* dapat digunakan pada rentang 7,1-8,5 g/cm³. Menurut Kruachatturat [4] kekuatan tekan yang harus dimiliki peluru *frangible* pada rentang 31-310 MPa dengan nilai kekerasan 54-119 HV. *Frangibility* dari sebuah peluru dipengaruhi oleh faktor karakteristik peluru, karakteristik target, dan kondisi impak. Mengacu pada karakteristik peluru, *frangibility* dari peluru dipengaruhi oleh sifat mekanik dari peluru, dimensi peluru, dan bentuk peluru. *Frangibility* akan meningkat seiring dengan menurunnya kekuatan dan ketangguhan dari material pembentuk peluru [5].

Prinsip dalam pembentukan serbuk adalah memadatkan serbuk logam menjadi serbuk yang diinginkan kemudian memanaskannya di bawah temperatur lelehnya. Sehingga partikel-partikel logam memadu karena mekanisme transformasi massa akibat difusi atom antar permukaan partikel. Pemanasan dalam pembuatan serbuk dikenal dengan *sinter* yang menghasilkan ikatan partikel yang halus, sehingga kekuatan dan sifat fisisnya meningkat. Produk hasil dari metalurgi serbuk terdiri dari campuran serbuk berbagai macam logam atau non logam. [6]. Pada proses metalurgi serbuk terdapat beberapa tahapan meliputi karakterisasi serbuk, pencampuran, kompaksi, dan sintering.

Karakteristik dasar serbuk meliputi ukuran serbuk, distribusi ukuran serbuk, bentuk serbuk, berat jenis serbuk, mampu alir (*flowability*), dan mampu tekan (*compressibility*) [7]. Pencampuran serbuk pada umumnya dibedakan menjadi dua yaitu pencampuran basah dan pencampuran kering. Pencampuran basah dilakukan untuk logam-logam yang mudah teroksidasi seperti tembaga Cu. Sehingga perlu dilakukan pencampuran basah dengan menggunakan pelarut

polar seperti ethanol. Untuk mendapatkan bentuk yang diinginkan pada sebuah produk maka perlu dilakukan proses kompaksi. Kompaksi merupakan suatu proses pembentukan atau pemampatan terhadap serbuk murni atau paduan atau campuran dari berbagai macam serbuk sehingga mempunyai bentuk tertentu dan mempunyai kekuatan yang cukup untuk mengalami proses selanjutnya [8]. Adanya kenaikan tekanan yang diberikan maka densitas serbuk akan meningkat tetapi porositas menurun [9]. Sintering dilakukan untuk mendapatkan ikatan yang lebih baik setelah proses kompaksi. Sintering terbagi menjadi beberapa jenis antara lain *solid state sintering*, *liquid phase sintering*, *activated sintering*, dan *reaction sintering*. *Liquid phase sintering* merupakan proses sintering yang melibatkan fasa cair. Pada proses *liquid phase sintering* terdapat dua kelarutan yang harus diperhatikan, yaitu kelarutan cairan dalam padatan dan kelarutan padatan dalam cairan. Kelarutan padatan dalam cairan yang semakin besar semakin disukai karena akan mendorong fasa padat masuk ke dalam fasa cair sehingga mengisi porositas pada matriks [10].

Komposit merupakan material yang terbentuk dari kombinasi antara dua atau lebih material pembentuknya melalui pencampuran yang tidak homogen, dimana sifat mekanik dari masing-masing material pembentuknya yang berbeda [11]. Perbedaan dan penggabungan dari unsur-unsur yang berbeda menyebabkan daerah-daerah berbatasan. Daerah itu disebut *interface*. Sedangkan daerah ikatan antara material penyusun komposit disebut *interphase*. Kualitas ikatan antarmuka (kompaktibilitas) akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai modulus elastisitas. Nilai modulus elastisitas ini didapatkan dari hasil pengujian mekanik [12].

Dengan menggunakan *Rule of Mixture (ROM)* yang dinyatakan dengan persamaan :

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad (1)$$

dimana:

- ρ_c = densitas komposit
- ρ_m = densitas matriks
- ρ_f = densitas *reinforced*
- V_m = fraksi volume matriks
- V_f = fraksi volume *reinforced*

Dengan perumusan berikut,

$$m_m = a \cdot m_c \text{ dan } m_b = b \cdot m_c \quad (2)$$

Massa serbuk yang terdiri dari massa matriks dan massa *binder* yang dibutuhkan untuk pembuatan komposit dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut.

- Massa matriks

$$m_m = a \cdot \frac{xy}{ay+bx} \cdot v_c \quad (3)$$

- Massa *binder*

$$m_b = b \cdot \frac{xy}{ay+bx} \cdot v_c \quad (4)$$

dimana:

- m_m = massa matriks
- m_b = massa *binder*
- a = fraksi massa matriks
- b = fraksi massa *binder*
- x = densitas matriks
- y = densitas *binder*
- V_c = volume komposit

Besarnya porositas pada komposit dapat diketahui dari densitas teoritik dan densitas sinter pada komposit tersebut. Perhitungannya dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\Phi = 1 - (\rho_s / \rho_t) \quad (5)$$

dimana;

Φ = Porositas

ρ_s = *Sinter Density* (gr/cm³)

ρ_t = densitas teoritik (gr/cm³)

Hubungan antara modulus elastisitas dengan kekuatan tekan yang dinyatakan sebagai persamaan berikut.

$$E = 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \quad (6)$$

dimana :

E = Modulus elastisitas (GPa)

f_{cm} = *Compressive strength* (MPa)

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Persiapan Bahan

Pengayakan serbuk Cu (Sigma-Aldrich, USA) untuk mendapatkan ukuran distribusi serbuk yang sama yaitu rata-rata $12,969 \pm 2,21 \mu\text{m}$. Serbuk Sn (Sigma-Aldrich, USA) yang digunakan berukuran rata-rata $8,044 \pm 3,65 \mu\text{m}$. Selanjutnya serbuk ditimbang menggunakan neraca analitik berdasarkan komposisi masing-masing yaitu 5,10, dan 15wt% Sn sedangkan untuk Cu sebesar 95, 90, dan 85wt% dalam fraksi berat.

B. Proses Percobaan

Pencampuran serbuk Cu dan Sn dilakukan menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit dengan menggunakan pelarut polar *ethanol*. Proses kompaksi dilakukan dengan menggunakan pelumas *zinc stearat* (Sigma-Aldrich, USA). Proses pelumasan dengan menggunakan metode *die wall lubricating*. Kompaksi dilakukan dengan variasi tekanan 300, 400, dan 500 Mpa. Pengukuran densitas setelah kompaksi (densitas *green*) dilakukan dengan menimbang massa sampel, mengukur tinggi serta diameter sampel untuk mendapatkan volume sampel. Proses sintering dilakukan pada temperatur dan waktu tahan yang konstan yaitu 260°C selama 30 menit menggunakan atmosfer gas nitrogen dengan *horizontal furnace*. Densitas *sinter* merupakan densitas setelah proses sintering yang dilakukan dengan menimbang massa sampel pada kondisi kering dan di dalam fluida sehingga didapatkan pengurangan massa kemudian sampel dikeringkan.

C. Preparasi Sampel Pengujian

Preparasi sampel dilakukan pada beberapa sampel untuk pengujian. Pengujian XRD dan SEM menggunakan sampel yang berbentuk silinder dengan diameter 14,6mm dan tinggi 5mm dipotong secara melintang untuk mengetahui persebaran fasa yang terbentuk dan porositas. Sampel yang dilakukan uji SEM dan XRD permukaannya harus rata sedangkan untuk pengujian SEM harus halus oleh karena itu dilakukan proses *grinding*.

D. Pengujian Sampel

Pengujian terhadap sampel dilakukan dengan pengujian densitas, XRD, SEM, pengujian tekan, dan pengujian kekerasan. Sampel untuk uji densitas berdiameter 14,6 mm dan tinggi 14,6 mm. Pengujian SEM dan XRD menggunakan alat *PAN Analytical*. Pengujian tekan dilakukan pada sampel yang memiliki tinggi dan diameter 14,6 mm. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat UTM (*Universal Testing Machine*) tipe Gotech-Gt-7001-LC50 dengan cara pembebanan hingga mencapai kekuatan tekan maksimum. Pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell skala F.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Proses Pembuatan Proyektil Peluru Frangible Komposit Cu-Sn dengan Metode Metalurgi Serbuk

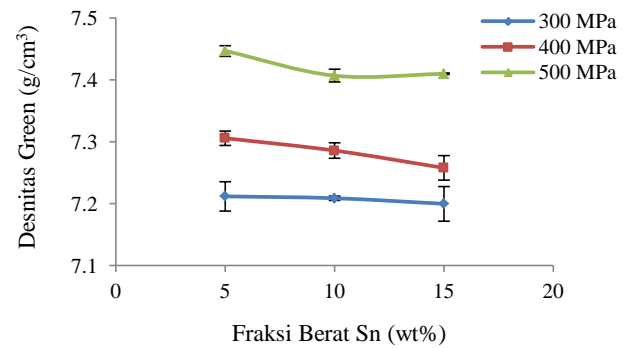
Pada penelitian ini digunakan MMCs Cu-Sn dimana logam Cu berperan sebagai matriks dan logam Sn berperan sebagai pengikat. Pemilihan logam Cu sebagai material dasar dikarenakan densitasnya yang cukup tinggi sehingga dapat memenuhi persyaratan yang dibutuhkan. Pemilihan logam Sn sebagai pengikat karena memiliki temperatur leleh yang rendah sehingga lebih mudah membasahi logam Cu. Diharapkan pepaduan logam Cu-Sn akan menghasilkan *frangibility* yang baik pada aplikasi proyektil peluru *frangible*.

Proses awal dilakukan dengan preparasi bahan dan dilakukan proses *sieving* untuk mendapatkan ukuran serbuk Cu dan Sn yang relatif sama. Hasil pengamatan SEM serbuk Cu berbentuk *sponge* dan *irregular* sedangkan serbuk Sn berbentuk *spherical* dan *ligament*. Proses selanjutnya yang dilakukan adalah proses penimbangan serbuk sesuai dengan komposisi yang digunakan. Proses pencampuran antara serbuk Cu dan serbuk Sn dilakukan dengan pencampuran basah hal ini dikarenakan serbuk Cu mudah teroksidasi sehingga akan mempengaruhi hasil dari proses pencampuran. Variasi yang digunakan berdasarkan fraksi berat Sn yaitu Cu-5 wt% Sn, Cu-10wt% Sn, dan Cu-15 wt% Sn. Sampel kemudian dikompaksi dengan tekanan 300, 400, dan 500 MPa. Pada proses kompaksi juga ditambahkan pelumas *zinc stearat*. Hal ini dilakukan untuk mempermudah proses eaksi sampel yang telah dikompaksi. Kemudian sampel disintering dengan menggunakan *horizontal furnace* pada temperatur 260°C selama 30 menit dengan atmosfer gas nitrogen. Hal ini dimaksudkan agar sampel tidak teroksidasi.

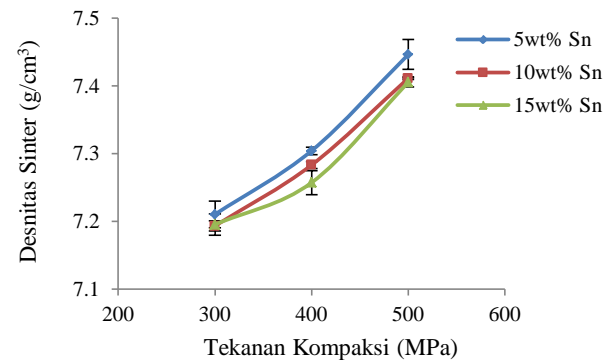
B. Pengaruh Variasi Komposisi Sn dan Tekanan Kompaksi terhadap Densitas dan Porositas Komposit Cu-Sn

Densitas merupakan salah satu syarat yang diperlukan untuk mendukung kinerja balistik yang baik pada sebuah peluru. Densitas sendiri secara umum dibedakan menjadi dua yaitu densitas *green* yang merupakan densitas yang didapatkan setelah proses kompaksi dan yang kedua densitas *sinter* yang didapatkan setelah proses sintering.

Berdasarkan Gambar 1 menunjukkan hubungan nilai densitas *green* dengan komposisi Sn. Dari data tersebut menunjukkan bahwa penambahan komposisi Sn semakin menurunkan nilai densitas *green* dari komposit Cu-Sn. Hal ini disebabkan karena nilai densitas dari unsur Sn yang lebih



Gambar 1. Grafik hubungan komposisi Sn terhadap densitas *green* komposit Cu-Sn

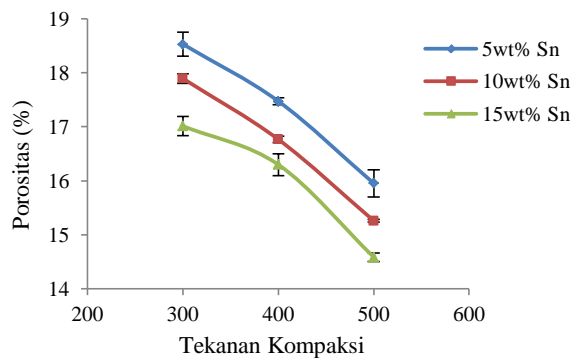


Gambar 2. Grafik hubungan komposisi Sn terhadap densitas sinter komposit Cu-Sn

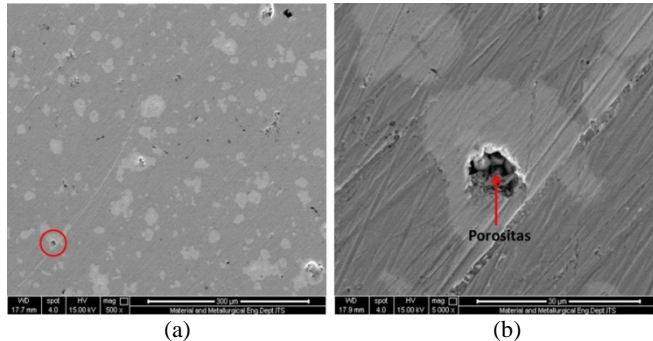
rendah dari unsur Cu. Sehingga semakin meningkatnya komposisi dari Sn akan menurunkan nilai densitas *green* dari komposit Cu-Sn. Saat proses kompaksi komposit Cu-Sn telah menjadi suatu padatan yang solid. Tetapi untuk ikatan yang terjadi antara serbuk Cu dan serbuk Sn masih terjadi secara mekanik. Sehingga ikatan yang dihasilkan perlu ditingkatkan untuk menunjang kebutuhan pada aplikasi peluru *frangible*. Untuk itu proses yang dilakukan selanjutnya adalah proses sintering. Proses sintering dilakukan agar kepadatan dari serbuk penyusun komposit Cu-Sn semakin meningkat. Hal ini disebabkan pada proses sintering terjadi proses difusi antar partikel serbuk.

Berdasarkan Gambar 2 menunjukkan hubungan antara tekanan kompaksi dan nilai densitas sinter. Dari data tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan kompaksi maka nilai dari densitas sinter semakin meningkat. Dari data tersebut diperoleh bahwa densitas sinter yang paling tinggi diperoleh pada tekanan kompaksi 500 MPa dan komposisi 5% Sn. Semakin tingginya tekanan kompaksi berpengaruh terhadap peningkatan densitas komposit Cu-Sn. Hal ini disebabkan adanya *interlocking*. *Interlocking* antar partikel akan mempermudah terjadinya proses difusi antar partikel saat mengalami proses sintering. Selain itu menurut Upadhyaya [13] semakin meningkatnya tekanan kompaksi maka kontak antar partikel akan meningkat sehingga akan meningkatkan proses difusi antar partikel.

Berdasarkan hasil pengujian densitas sinter diperoleh nilai densitas sinter untuk seluruh spesimen uji dengan rentang 7,193–7,446 g/cm³. Penggunaan *zinc stearat* pada proses pelumasan diindikasikan mempengaruhi densitas yang didapatkan dari hasil pengujian. Karena pada saat proses



Gambar 3 Grafik hubungan tekanan kompaksi terhadap porositas komposit Cu-Sn



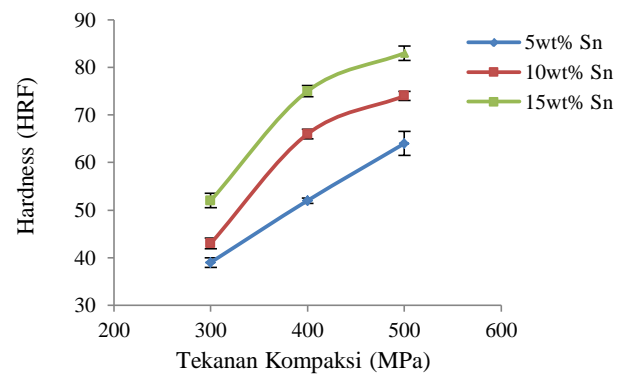
Gambar 4 Pengamatan SEM bagian melintang sampel Cu-5wt% Sn dengan tekanan 500 MPa (a) perbesaran 500x (b) perbesaran 5000x

pelumasan jumlah *zinc stearat* yang digunakan berlebihan. Hal tersebut akan mempengaruhi jumlah porositas yang terdapat pada komposit Cu-Sn. Maka densitas yang didapatkan akan berpengaruh terhadap densitas teoritis. Tetapi nilai yang diperoleh telah sesuai dengan standar yang dibutuhkan oleh peluru *frangible* yaitu kisaran 7,1–8,5 g/cm³. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Benini [2] dan Joys [1] densitas yang diperoleh memiliki rentang 70% - 85% dari densitas teoritis pada penelitian kali ini.

Pembuatan komposit sangat erat kaitannya dengan keberadaan dari porositas. Porositas sendiri merupakan bagian yang tidak koheren setelah komposit mengalami proses sintering, yaitu berupa kekosongan yang diisi oleh gas atau *lubricant*.

Berdasarkan Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan kompaksi maka akan semakin sedikit porositas yang terbentuk. Hal ini sesuai dengan yang dijelaskan oleh Abdoli [14] tekanan kompaksi yang lebih tinggi menyebabkan interaksi antar gesekan partikel lebih tinggi sehingga mengurangi jumlah dari porositas. Pada proses kompaksi akan mempengaruhi terbentuknya porositas yang ada pada komposit Cu-Sn. Karena pada proses kompaksi akan menentukan tingkat distribusi serbuk. Distribusi serbuk akan dipengaruhi oleh adanya friksi antar serbuk dan juga dari bentuk serbuk [9].

Dari hasil pengamatan SEM pada Gambar 4 menunjukkan adanya porositas. Porositas kemungkinan terjadi karena adanya proses difusi selama pertumbuhan senyawa intermetalik pada proses sintering. Proses mekanisme *liquid phase sintering* tentunya berpengaruh terhadap terbentuknya porositas. Pada proses sintering memungkinkan terjadinya gas



Gambar 5 Grafik hubungan komposisi Sn dan tekanan kompaksi terhadap kekerasan komposit Cu-Sn

yang terperangkap yang menyebabkan terbentuknya porositas. Pada proses *liquid phase sintering* unsur Sn akan meleleh sehingga Sn akan mengalir dan melarutkan Cu. Dengan meningkatnya komposisi Sn akan semakin meningkatkan jumlah fasa *liquid* yang ada. Karena pada penelitian ini serbuk Cu yang digunakan berporos maka dengan Sn yang meleleh akan menyelimuti Cu sehingga jumlah porositas yang terbentuk akan semakin kecil seiring dengan meningkatnya komposisi Sn. Menurut German [8] porositas berpengaruh terhadap sifat mekanik, adanya porositas dapat menurunkan sifat mekanik karena porositas dapat mengakibatkan konsentrasi tegangan sehingga mudah untuk berdeformasi plastis dan lokalisasi tegangan.

C. Pengaruh Variasi Komposisi Sn dan Tekanan Kompaksi terhadap Sifat Mekanik Komposit Cu-Sn

Kekerasan dan kekuatan tekan merupakan sifat mekanik yang perlu dikaji dalam pembuatan peluru *frangible*. Karena sifat mekanik tersebut erat kaitannya dengan kinerja dari sebuah peluru. Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kekerasan yang dimiliki sehingga dapat dilakukan perbandingan dengan kekerasan dari sebuah laras (senapan). Karena jika kekerasan dari sebuah peluru melebihi kekerasan sebuah laras maka dikhawatirkan akan merusak laras tersebut. Untuk itu perlu dilakukan pengujian kekerasan pada penelitian ini untuk mencegah terjadinya permasalahan tersebut.

Kekerasan merupakan ketahanan suatu material terhadap indentasi akibat beban dinamis atau statis, kekerasan indentasi, ketahanan terhadap goresan maupun abrasi. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kruachatturat [4] nilai dari kekerasan yang dibutuhkan oleh peluru *frangible* adalah 54-119 HV atau 33-95 HRF. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Rockwell tipe F. Hal ini dilakukan karena material komposit Cu-Sn merupakan material yang lunak sehingga digunakan pengujian kekerasan tipe HRF. Selain itu jika digunakan pengujian kekerasan tipe Vickers pada komposit, dikhawatirkan akan mempengaruhi hasil dari pengujian karena adanya porositas pada komposit.

Berdasarkan Gambar 5 menunjukkan nilai kekerasan komposit Cu-Sn tertinggi diperoleh saat komposisi 15 wt% Sn pada tekanan 500 MPa sebesar 83 HRF. Sedangkan nilai kekerasan terendah pada komposisi 5 wt% Sn pada tekanan 300 MPa sebesar 39 HRF. Pada penelitian ini hasil pengujian kekerasan telah memenuhi standar kekerasan peluru *frangible*.

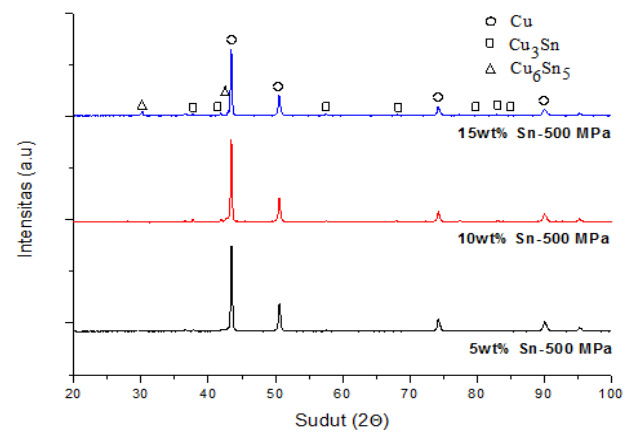
Menurut Kruachatturat [4] kekerasan yang dibutuhkan peluru *frangible* pada rentang 33-95 HRF. Komposisi Sn berpengaruh terhadap penambahan nilai kekerasan komposit Cu-Sn. Karena semakin banyak komposisi Sn pada komposit Cu-Sn akan diikuti meningkatnya senyawa fasa kedua. Senyawa fasa kedua Cu_3Sn dan Cu_6Sn_5 memiliki nilai kekerasan yang tinggi dengan rata-rata mencapai 510 HV [15]. Sehingga berdasarkan hal tersebut senyawa intermetalik atau senyawa fasa kedua yang muncul meskipun dalam jumlah yang relatif kecil akan mempengaruhi nilai kekerasan dari komposit Cu-Sn. Hal ini diperkuat dengan teori yang dikemukakan oleh Grathwohl dan Warren dimana kekerasan akan semakin meningkat seiring dengan kehadiran dari fasa kedua (senyawa intermetalik) dan ukuran butir yang semakin kecil [8].

Hal ini didukung dengan data pengujian XRD senyawa intermetalik Cu_3Sn dan Cu_6Sn_5 teridentifikasi terbanyak pada saat komposisi 15 wt% Sn. Pada Gambar 6 menunjukkan perbandingan kurva hasil pengujian XRD pada komposisi 5, 10, 15 wt% Sn dengan tekanan kompaksi 500 MPa. Fasa yang dominan adalah fasa Cu sesuai dengan pencocokan dengan kartu PDF 04-0836. Fasa senyawa Cu_3Sn telah terbentuk pada saat komposisi 5wt% Sn sesuai dengan pencocokan kartu PDF 03-1010. Semakin bertambahnya komposisi semakin banyak fasa senyawa Cu_3Sn yang terbentuk. Pada komposisi 15 wt% Sn muncul fasa Cu_6Sn_5 . Senyawa tersebut diidentifikasi dengan menggunakan kartu PDF 45-1488. Senyawa intermetalik yang muncul disebabkan karena adanya proses difusi dari partikel Cu pada partikel Sn [16].

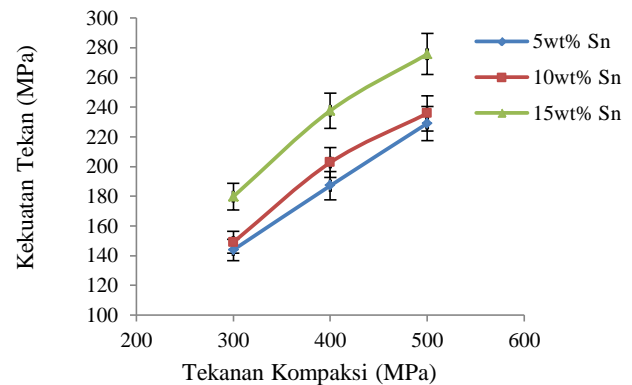
Jika dilihat pada diagram fasa Cu-Sn meskipun komposisi yang digunakan tidak dapat menghasilkan senyawa intermetalik Cu_6Sn_5 . Tetapi karena proses sintering yang digunakan telah mencapai titik leleh Sn maka akan terjadi proses difusi dari Cu kepada Sn. Sehingga komposisi yang didapatkan akan menghasilkan senyawa intermetalik Cu_6Sn_5 . *Frangibility* yang muncul akan dipengaruhi oleh senyawa intermetalik. Menurut Banovic [17] pada temperatur 260°C tidak terjadi ikatan metalurgi dari serbuk Cu. Karena ikatan metalurgi tidak akan terbentuk pada sintering temperatur rendah. Senyawa intermetalik yang terbentuk sebagai pengikat memiliki karakteristik keuletan dan ketangguhan yang rendah. Dari hasil pengujian XRD menunjukkan bahwa semakin meningkatnya komposisi Sn diikuti dengan meningkatnya jumlah dari fasa senyawa intermetalik. Dengan adanya senyawa intermetalik yang lebih banyak akan mempengaruhi kekerasan dari komposit Cu-Sn. Kekerasan yang semakin meningkat juga dapat dipengaruhi oleh jumlah porositas yang cenderung semakin menurun seiring dengan meningkatnya komposisi Sn dan tekanan kompaksi.

Pada proses pengujian tekan sampel yang digunakan berupa *pellet* dengan perbandingan diameter dan tinggi 1:1. Sampel dilakukan pengujian tekan hingga terjadi tanda-tanda kerusakan. Ketika daya tekan telah mencapai kekuatan maksimum maka pembebanan dihentikan.

Berdasarkan Gambar 7 menunjukkan bahwa penambahan komposisi Sn semakin meningkatkan kekuatan tekan dari komposit Cu-Sn. Kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada komposisi 15 wt% Sn pada tekanan 500 MPa sebesar 275,72

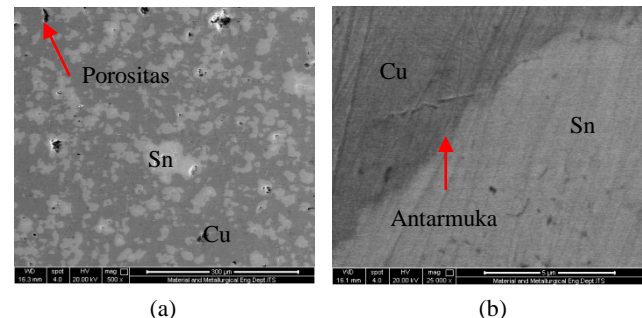


Gambar 6 Grafik analisa XRD pada komposisi 5, 10, dan 15 wt% Sn dengan tekanan kompaksi 500 MPa



Gambar 7 Grafik hubungan komposisi Sn dan tekanan kompaksi terhadap kekuatan tekan komposit Cu-Sn

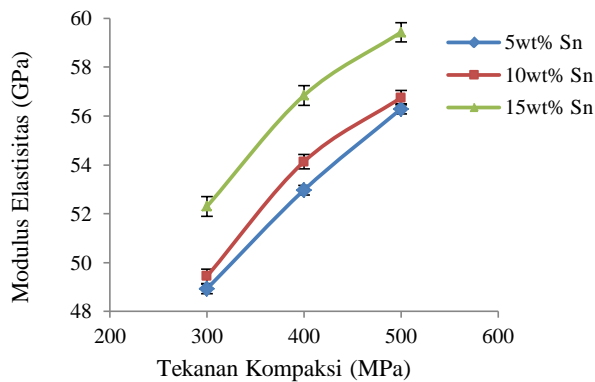
D. Analisa Antarmuka Komposit Cu-Sn



Gambar 8 Hasil pengamatan SEM komposit Cu- 15 wt% Sn dengan tekanan kompaksi 300 MPa (a) perbesaran 500x (b) perbesaran 25.000x

MPa. Sedangkan nilai kekuatan tekan terendah pada komposisi 5 wt% Sn pada tekanan 300 MPa sebesar 143,86 MPa. Pada penelitian ini nilai kekuatan tekan yang didapatkan telah sesuai dengan standar dari peluru *frangible* komersial yaitu 31-310 MPa. Kekuatan tekan yang semakin meningkat diindikasikan dipengaruhi oleh jumlah porositas. Karena semakin meningkatnya tekanan kompaksi dan komposisi Sn maka akan semakin menurunkan porositas. Semakin menurunnya jumlah porositas diikuti oleh semakin meningkatnya nilai dari kekuatan tekan yang diperoleh dari hasil pengujian tekan.

Pada pengamatan SEM Gambar 8 menunjukkan adanya ikatan antarmuka komposit Cu- 15 wt% Sn. Ikatan antarmuka



Gambar 9 Grafik hubungan komposisi Sn dan tekanan kompaksi terhadap modulus elastisitas komposit Cu-Sn

yang terjadi terlihat bahwa permukaan yang dihasilkan antar fasa sudah terbentuk rapat. Dikarenakan daerah ikatan antar partikelnya (*weld bond*) terlihat panjang. Hal ini memungkinkan terjadi karena pada komposit Cu-Sn dimana Cu berperan sebagai matriks dan Sn berperan sebagai pengikat. Pada proses pembuatannya Sn mencair terlebih dahulu sehingga akan membasahi Cu. Dengan demikian ikatan antarmuka yang terjadi akan semakin baik pula. Selain itu menurut German [8] kehadiran fasa *liquid* berperan pada proses *wetting* akan membentuk ikatan *pendular* yang akan meningkatkan kekuatan ikatan interpartikel.

Berdasarkan Gambar 9 Modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada komposisi Cu-15 wt% Sn dengan tekanan kompaksi 500 MPa sebesar 59,43 GPa. Nilai modulus elastisitas terendah pada komposisi Cu-5 wt% Sn dengan tekanan kompaksi 300 MPa sebesar 48,93 GPa. Semakin meningkatnya modulus elastisitas maka dapat dikatakan kompaktibilitas (kualitas ikatan antarmuka) semakin tinggi [12]. Semakin meningkatnya kekuatan ikatan ini akan berpengaruh terhadap kinerja dari proyektil peluru *frangible* karena menurut Rydlo [5] *frangibility* akan meningkat jika kekuatan dan ketangguhan dari *properties* suatu material menurun. Dengan demikian untuk mendapatkan kualitas proyektil peluru *frangible* yang baik maka dibutuhkan kompaktibilitas yang tidak terlalu tinggi. Selain dari sifat mekanik, *frangibility* dari sebuah peluru diindikasikan juga dipengaruhi oleh jumlah porositas sehingga semakin banyak porositas maka *frangibility* dimungkinkan untuk terjadi peningkatan.

IV. KESIMPULAN

Semakin meningkatnya komposisi Sn maka nilai densitas *green* dan densitas sinter dari komposit Cu-Sn semakin menurun. Sebaliknya semakin meningkatnya tekanan kompaksi maka nilai dari densitas *green* dan densitas sinter semakin meningkat. Nilai densitas tertinggi komposit Cu-Sn pada komposisi Cu-5 wt% Sn dengan tekanan kompaksi 500 MPa sebesar 7,446 g/cm³. Selain itu komposisi Sn dan variasi tekanan kompaksi memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik komposit Cu-Sn. Semakin meningkatnya komposisi Sn dan tekanan kompaksi maka nilai kekerasan, kekuatan tekan dan modulus elastisitas dari komposit Cu-Sn semakin meningkat. Nilai kekerasan, kekuatan tekan, dan modulus

elastisitas tertinggi komposit Cu-Sn pada komposisi Cu-15 wt% Sn dengan tekanan kompaksi 500 MPa sebesar 83 HRF, 275,72MPa dan 59,43 GPa.

UCAPAN TERIMA KASIH

“Penulis V.G.A. mengucapkan terima kasih kepada DIKTI Kementerian pendidikan Nasional Melalui Hibah Penelitian Prioritas Nasional Masterplan Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia 2011-2025 (PENPRINAS MP3EI 2011-2025) tahun 2012 yang telah memberikan dana penelitian pada penulis, dosen pembimbing Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. Serta atas dukungan dan motivasi orang tua tercinta yang telah membuat penulis semangat mengerjakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Joys, J. 2009. Lead Free Frangible Bullets. Amerika Serikat. Nomor Paten: US 8,225,718 B2
- [2] Benini, J.C. 2001. Frangible Metal Bullets, Ammunition, and Method of Making Such Articles. Amerika Serikat. Nomor Paten: US 6,263,798 B1
- [3] Nadkarni, A. V. 2003. Lead-Free Frangible Bullets and Process for Making Same. Amerika Serikat Nomor Paten: US 6,536,352 B1
- [4] Kruachaturrat, S., Thanomsilp, C., Wattanasiriwech, S. 2009. “Sintering Cu-Sn Materials for Frangible Bullets.” *The 3rd Thailand Metallurgy Conference (TMETC-3): Metallurgical Research for Thailand Development*. Bangkok, Thailand
- [5] Rydlo, M. 2010. “Theoretical Criterion for Evaluation of the Frangibility Factor”. *Advances in Military Technology* Vol.5, No. 2
- [6] Jones, W.D. 1960. *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*. Edward Arnold. London.
- [7] Chandrawan, D. dan Myrna A. 1999. *Metalurgi Serbuk: Teori dan Aplikasi* Jilid I, Depok.
- [8] German, R. M. 1984. *Powder Metallurgy Science*. (USA: Metal powder Industries Federation.)
- [9] Al-Qureishi, H.A. dkk. 2008. “Analysis of The Fundamental Parameter of Cold Die Compaction of Powder Metallurgy”. *Journal of Materials Processing Technology* 199; 417-424
- [10] Ekawati, D. 2008. Pengaruh Temperatur Sintering Terhadap Karakteristik Komposit Aluminium Grafit dengan Wetting Agent Tembaga. Depok
- [11] Gibson, F. R. 1994. *Principles of Composite Material Mechanics*, Singapura: McGraw-Hill
- [12] Widyastuti, Eddy S., dan Dedi P. 2008. “Kompaktibilitas Komposit Isotropik Al/Al₂O₃ dengan Variabel Waktu Tahan Sinter”. *Makara, Sains*, Volume 12: 113-119
- [13] Upadhyaya, A., Sethi, G., dan Agrawal, D.K. 2002. “Densification of Pre-mixed and Prealloyed Cu-12Sn Bronze During Microwave and Conventional Sintering. Federation Princeton, NJ. USA, 13 pp 364-375
- [14] Abdoli, H. 2008. “Study of The Densification of a Nanostructured Composite Powder Part I: Effect of Compaction Pressure and Reinforcemen Addition.” *Material Science and Engineering. A* 486 580-584.
- [15] Tiara, B. 1996. Pengaruh Kandungan Sn Dan Variabel Proses Metalurgi Serbuk Terhadap Karakteristik Paduan Dari Serbuk Cu Dan Sn. Depok
- [16] Ko. K.H., Lee, H., dan Choi, J.O. 2013. “Effects of Cu Feedstock on Intermetallic Compound Formation in Cold Sprayed Cu-Sn Coatings.” *International Journal of Material Science (IJMSCI)*. Volume 3 Issue 2
- [17] Banovic, S.W. 2007. “Microstrutural Characterization and Mechanical Behavior of Cu-Sn Frangible Bullets.” *Materials Science and Engineering A* 460-461 (2007) 428-435